

정화토양 및 배출가스의 환경적 특성 분석을 통한 저온열탈착장치의 현장 적용성 평가

오참똥¹ · 이응민² · 김용성³ · 전우진³ · 박광진¹ · 김치경¹ · 성기준² · 장윤영⁴ · 김국진^{1*}

¹(주)오이코스

²부경대학교 생태공학과

³국방부 주한미군이전사업단

⁴광운대학교 환경공학과

Field Applicability of Low Temperature Thermal Desorption Equipment through Environmental Impact Analysis of Remediated Soil and Exhaust Gas

Chamteut Oh¹ · Yongmin Yi² · Young-Soung Kim³ · Woo-Jin Jeon³ · Gwang-Jin Park¹
Chi-Kyung Kim¹ · Ki-June Sung² · Yoon-Young Chang⁴ · Guk-Jin Kim^{1*}

¹OIKOS Co. Ltd.

²Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

³USFK Base Relocation Office, Ministry of National Defense

⁴Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

Geochemical and ecological properties of remediated soil and gas exhausted from a low-temperature thermal desorption (LTTD) process were analyzed to assess the environmental impact of LTTD treatment. Soil characteristics were examined with regard to the chemical (EC, CEC, and organic matter) and the ecological (dehydrogenase activity, germination rate of *Brassica juncea*, and growth of *Eisenia andrei*) properties. The exhaust gases were analyzed based on the Air Quality Act in Korea as well as volatile organic compounds (VOCs) and mixed odor. Level of organic matter of the soil treated by LTTD process was slightly decreased compared to that of the original soil because the heating temperature (200°C) and retention time (less than 15 minutes) were neither high nor long enough for the oxidation of organic matter. The LTTD process results in reducing TPH of the contaminated soil from 5,133 ± 508 mg/kg to 272 ± 107 mg/kg while preserving soil properties. Analysis results of the exhaust gases from the LTTD process satisfied discharge standard of Air Quality Law in Korea. Concentration of VOCs including acetaldehyde, propionaldehyde, butyraldehyde and valeraldehyde in circulation gas volatilized from contaminated soil were effectively reduced in the regenerative thermal oxidizer and all satisfied the legal standards. Showing ecologically improved properties of contaminated soil after LTTD process and environmentally tolerable impact of the exhaust gas, LTTD treatment of TPH-contaminated soil is an environmentally acceptable technology.

Key words : Environmental impact assessment, Low Temperature Thermal Desorption (LTTD), Soil remediation, Exhaust gas, VOCs

1. 서 론

토양오염은 그 특성상 오염인자의 파악 및 복원이 어렵고 한번 오염된 토양은 지속적으로 주변 생태계에 악영향

을 미친다. 국내 토양오염은 대부분 유류에 의한 것으로 보고되고 있으며(환경부, 2007a) 군부대, 저유소 및 주유소, 송유관 등 유류를 취급하는 시설에서 주로 발생한다(최상일 · 김강홍, 2006, 환경부, 2007b). 오염토양의 정화

*Corresponding author : gjkim@oikos.co.kr

원고접수일 : 2012. 5. 7 심사일 : 2012. 5. 30 게재승인일 : 2012. 5. 30

질의 및 토의 : 2012. 8. 31 까지

는 굴착여부에 따라 In-situ와 Ex-situ 공법으로 분류되며 부지 내 시설의 운영계획, 오염특성, 발주처의 요구 등을 고려하여 정화공법을 선정한다. 국내에서 주로 활용되는 Ex-situ 정화공법은 토양경작법으로(환경부, 2007a) 정화비용이 저렴하고 많은 현장적용 실적을 보유하고 있다는 장점이 있다. 하지만 토양경작법은 계절 및 날씨변화에 따라 정화기간이 길어질 수 있고 고농도 및 난분해성 오염물질에 대해 효율이 낮은 단점이 있어(최상일·김강홍, 2006, 양지원·이유진, 2007) 이를 보완하고자 최근 열탈착공법을 병행하여 정화하는 사례가 늘고 있다.

열탈착공법은 열을 가해 토양 내 존재하는 오염물질을 휘발시켜 제거하는 기술로 고농도 및 난분해성의 유기오염물질을 비교적 단기간에 제거하기 위해 주로 활용된다. 특히 저온열탈착(Low temperature thermal desorption; LTTD) 공법은 소각이나 고온열탈착 공법에 비해 비교적 낮은 온도에서 오염토양을 처리해 상대적으로 에너지 효율이 좋아 경제적이며 토양 내 유기물 분해 위험이 적고, 유류오염 현장의 주 오염인자인 휘발유, 제트연료, 등유, 경유, 난방유 및 윤활유와 같은 석유류 제품에는 높은 효율을 보인다는 점에서 널리 활용되고 있다(USEPA, 2004, Khan et al., 2004). 국내에서는 '부산 00지구 토양복원 사업'에 처음으로 열탈착장치가 활용되었으나 이때 활용된 장치는 캐나다에서 완제품으로 수입, 적용되어 현장특성에 맞게 장치의 운전조건을 원활하게 조절할 수 없었고 과도한 열에너지 소모와 고온의 배출 가스 제거설비의 부재 등으로 인한 2차적인 문제점들이 나타나 열탈착공법의 현장 적용기술 축적 및 국산기술 확보를 위한 연구개발이 시작되었다. 초기에는 저온열탈착장치의 정화효율 및 에너지 효율 향상을 위주로 연구가 진행되었고 개발된 기술을 통해 현재 다양한 오염현장에 저온열탈착장치가 활용되며 정화효율 및 에너지 경제성을 입증하고 있다(하상안·엄혜경, 2007, 김국진 외, 2008, 하상안·유미경, 2008).

최근 USEPA에서는 오염지역을 정화할 때 녹색정화 개념을 적용할 것을 권장하면서 사회적 관심이 녹색정화에 집중되고 있다(USEPA, 2008). 녹색정화란 정화 시 모든 환경적 영향을 고려하여 환경적 이익을 최대화하는 방향으로 정화시스템을 설계하는 것을 말하며 폐기물 재활용, 에너지 효율 향상 도모 및 정화과정의 전 과정에서 오염물질의 추적관리 등의 방법이 추천된다. 이와 함께 정화 효율 향상만을 고려하는 정화공법보다 환경에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 환경 친화적인 공법에 대한 요구가 증가하고 있다. Lee et al.(1998)은 화학 약품을 활용할 때 약품의 독성이 환경적으로 미치는 영향을 우선적

으로 고려해야 한다고 하였고, Luo et al.(2008)은 식물학적 정화를 이용해 토양 내 중금속을 제거하고자 할 때 용출액에 의해 탈착된 중금속이 지하수로 확산될 수 있는 잠재적 위험을 고려하여 정화를 수행해야 한다고 하였다. 이와 함께 고온의 열을 활용하는 열탈착장치의 환경적 영향에 대한 우려도 제기되고 있다. Statheropoulos et al.(2007)은 열탈착과정에서 배출되는 VOCs의 환경적 영향에 대한 평가가 필요하다고 하였으며 고온의 열로 인한 토양의 기능 열화 현상에 대한 평가도 필요한 상황이다.

본 연구에서는 저온열탈착장치가 환경에 미치는 영향을 평가하고자 저온열탈착장치를 통해 정화되는 토양의 특성 변화와 배출되는 배기가스의 성분을 분석하였다. 토양은 화학적 특성(EC, CEC, 유기물 함량)과 생태학적 특성(탈수소효소 활성도 변화, 적거자 발아율, 붉은줄 지렁이 증량변화)으로 나누어 분석하였고 배기가스는 대기환경보전법 배출규제항목, VOCs, 복합악취 농도를 분석하여 저온열탈착장치로 인한 토양 및 대기환경으로의 영향을 각각 파악하고자 하였다. 실험에 사용된 저온열탈착장치는 반환미군기지 정화현장에 적용된 실 규모 장치를 활용하였고, 정화 운영과정에서 얻은 정화 결과를 토대로 정화토양의 특성변화 및 배기가스의 성분분석을 통한 환경적인 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

2.1.1. 저온열탈착장치

본 실험에 이용된 저온열탈착장치는 regenerative thermal oxidizer(RTO) 내에서 생성된 열풍을 로터리킬른 내로 주입하여 토양 내 존재하는 오염물질을 휘발시킨 후 double cyclone과 back filter를 통해 분진을 제거하고 RTO에서 휘발성유기화합물(volatile organic compounds; VOCs)을 연소시킨 뒤 연소를 위한 추가공기 양만큼(약 30%) 대기 중으로 배출시키며 여열을 장치 내에서 순환시키는 원리로 오염토양을 정화한다(Fig. 1). 열풍의 온도는 원하는 조건에 따라 저온열탈착장치의 제어실에서 조절할 수 있으며, 본 실험에서는 토양의 온도를 약 200°C 까지 상승시키기 위해 토양의 수분함량에 따라 열풍의 온도를 약 700°C로 설정하였다. 오염토양은 선별을 통해 50 mm 이상의 잡석을 제거한 뒤 킬른 내로 투입되며 킬른 내에서 열풍과 반응 후 정화되어 외부로 배출된다. 오염토양의 체류시간은 킬른의 회전 속도 조절을 통해 결정되며 본 실험에서는 약 15분으로 고정시켰다.

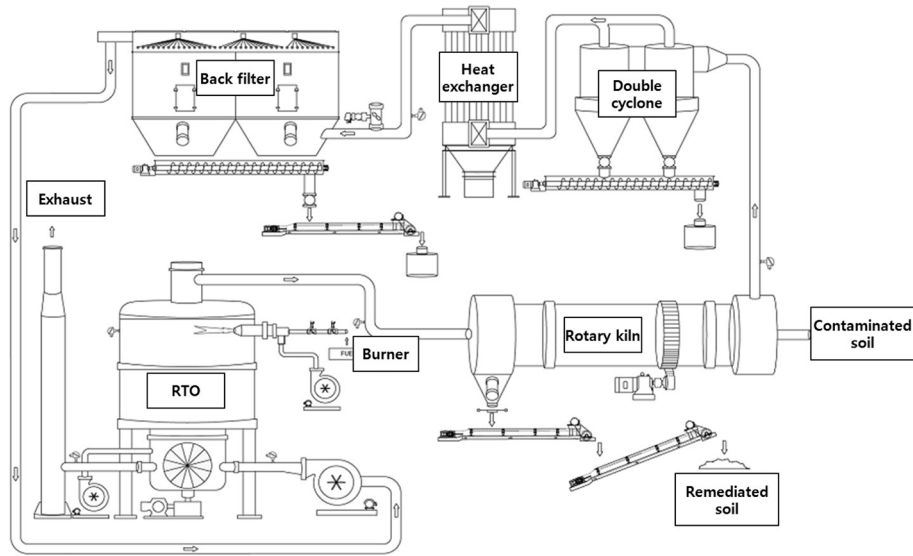


Fig. 1. Conceptual diagram of the Low Temperature Thermal Desorption (LTTD) equipment.

Table 1. Statistical analysis of TPH concentrations of contaminated and treated soils

	Contaminated soil	Treated soil
Mean concentration (mg/kg-TPH)	8,114	164
Standard deviation	3,573	99
Maximum concentration	22,283	449
Number of samples	91	60
Remediation period	10 months	

본 실험에 사용된 열탈착장치는 8 m³/hr의 용량을 가지고 24시간 연속운전이 가능한 실 규모 장치이며, 실제로 반환미군기지 정화사업에서 약 10개월간 연속적으로 정화 사업에 활용되어 약 8,000 m³의 오염토양을 정화하였다. Table 1은 열탈착장치에 유입되는 91개의 시료와 정화되어 나온 60여개의 시료를 분석한 결과를 나타내며 평균 8,114 mg/kg 농도의 TPH 오염토양이 평균 164 mg/kg으로 처리되어 모두 ‘토양오염우려기준(1지역)’을 만족하는 것으로 확인되었다.

2.1.2. 실험 토양

본 연구에 사용된 오염토양은 반환미군기지 정화현장 내 오염토양으로 토성은 통일분류법상 GM, SM 등으로 분류되며, 경질유로 오염되어 BTEX, TPH가 모두 확인되었으나, 실험에 사용된 토양은 TPH 단일오염으로 3개의 시료를 분석한 결과 그 농도는 5,133 ± 508 mg/kg이었다. 토양의 특성변화를 파악하기 위해 토양을 오염 및 정화이

력에 따라 세 가지 종류로 나누어 분석하였는데 이는 열탈착장치에 투입되기 전 오염토양(before TD), 열탈착장치를 통해 처리된 정화토양(after TD), 대조군으로 활용하기 위한 주변지역의 비 오염토양(Non-Contaminated Soil; NCS) 이다. 대규모 정화현장의 특성상 비 오염토양은 오염토양과 비교적 멀리 떨어진 곳에서 채취되었으므로 토양의 비 균질성을 고려하면 직접적인 비교가 어렵지만 배경 결과로 참고하였다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 토양의 화학적, 생태학적 특성변화

열탈착 과정에서 토양의 특성이 어떻게 변화되었는지 평가하고자 열탈착공법 적용 전후의 토양을 대상으로 화학적, 생태학적 특성변화를 살펴보았다. 토양의 화학적 특성은 TPH 농도를 포함하여 pH, EC, CEC, 유기물 함량을 분석하여 확인하였고, 생태학적 특성을 평가하기 위한 인자로는 미생물 탈수소효소 활성도(DHA), 적겨자 (*Brassica juncea*) 발아율 및 붉은줄 지렁이(*Eisenia andrei*) 중량변화를 선정하였다.

TPH 농도는 토양오염공정시험법에 근거하여 측정하였고, 토양 pH와 EC는 초자전극법을 통해 결정하였으며, CEC는 IN Acetic acid법, 유기물 함량은 강열감량법을 통해 각각 측정하였다. 탈수소효소 활성도는 습윤 토양 3 g에 CaCO₃ 0.03 g, 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TTC)용액 1 mL와 멸균수 2.5 mL를 넣고 37°C에서 24 시간 동안 배양한 후 메탄올을 이용해 추출하여 추출액

속의 TPF(Triphenyl formazan)의 양을 485 nm에서 spectrophotometer(UV-1700, Shimadzu, Japan)를 이용하여 측정하였다(Baligar et al., 1991). 열탈착공정이 정화토양의 식물 발아율에 미치는 영향을 조사하고자 풍건된 토양 45 g을 페트리디쉬에 담고 적겨자 씨앗 10개를 파종하여 온도 23°C, 습도 80%의 조건으로 식물배양기(Hanbaek scientific Technology, Korea)에서 발아실험을 3회 반복으로 수행하였다. 비 오염토양에서의 발아율이 75% 이상을 기록한 8일 후를 기준으로 오염토 및 정화토에 파종된 씨앗 중 발아된 씨앗의 비율을 계산하였다. 붉은줄 지렁이의 중량변화는 풍건된 토양 450 g을 뚜껑이 있는 유리병에 담고 붉은줄 지렁이를 5마리씩 각각의 유리병에 담은 후 빛을 차단한 23°C의 항온배양기(Dasol scientific, Korea)에서 배양하였다. 유류오염물질의 독성이 지렁이의 생장에 미치는 영향을 충분히 관측하기 위해 배양 후 14일 간의 중량변화를 3회 반복하여 측정하였다(Robidoux et al., 1999, Shakir Hanna and Weaver, 2002, Wang et al., 2009).

2.2.2. 저온열탈착장치의 배출가스 분석

저온열탈착장치의 배출가스가 대기환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 RTO 내 연소공정 전후에서 가스시료를 채취하여 분석을 수행하였다. 시료 분석은 대기환경보전법 배출규제항목, VOCs 총량, 복합악취 검사를 기준으로 수행되었다. RTO 내 연소과정을 통해 VOCs가 제거되기 때문에 RTO 전후의 시료를 분석함으로써 RTO를 통한 VOCs 제거효율을 평가할 수 있었다. 대기환경보전법의 배출규제항목 및 복합악취는 배출가스가 배출되는 '배출구'와 '부지 경계'에서 측정하도록 고시되어있다. 본 실험에서는 RTO를 거쳐 배출되는 굴뚝(stack)을 '배출구'로, 정화사업부지의 경계 중 굴뚝과 부지와의 최단거리 및 민가의 위치를 함께 고려한 지역을 '부지 경계'로 결정하여 배출가스에 가장 민감한 영향을 받는 지점을 선정하고자 하였다. '부지 경계' 측정지점은 열탈착장치로부터 약 15 m 떨어져 있고 바람의 방향이 민가 방향일 때 측정하

였다. 배출허용기준은 가장 엄격한 '기타지역'에 준하여 설정하였으며 모든 분석은 검증전문기관에 의뢰하여 각 분석항목별 대기오염공정시험법에 따라 측정하였다.

2.2.3. 통계 분석

별도의 언급이 없는 경우 모든 결과는 3번 반복 수행되어 그 평균값이 표준편차와 함께 표현되었다. 저온열탈착 처리 전과 후 토양의 화학적, 생태학적 특성 값의 변화가 유의미한 차이를 나타내는지 검정하기 위해 유의 수준을 95%를 기준으로 한 F-검정과 t-검정을 수행하였다. 통계적 분석결과 정화 전과 후의 결과 값이 유의미한 차이를 나타낼 경우 *로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양의 화학적 특성변화

열탈착공법 적용에 의한 토양의 화학적 특성변화를 Table 2에 나타내었다. 토양은 약 $5,133 \pm 508$ mg/kg 농도의 TPH로 오염되었으나 열탈착 정화과정을 통해 272 ± 107 mg/kg으로 저감되었으며 토양오염우려기준(1지역)을 만족하였다. 정화 후 토양의 pH값은 다소 증가하였으나 ($p < 0.007$)* 약산성의 범위를 벗어나지 않았다. EC와 CEC는 정화과정을 통해 각각 0.680 dS/m($p < 0.010$)*, 1.393 cmol/kg($p < 0.067$)씩 감소하였으나 토양의 적정 EC 값이 2.0 dS/m 이하라는 점(정병간 외, 1998, 농촌진흥청, 1999)과 한국조경학회(2002)는 토양의 CEC값이 6 cmol/kg 이하일 때 동일한 등급(하급)으로 분류한다는 점을 고려할 때 정화과정 중 저하된 EC와 CEC의 값은 토양의 화학적 특성 변화에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 정화토양의 EC와 CEC값이 정화과정을 통해 감소된 이유는 열탈착과정(double cyclone와 back filter)에서 상당량의 미세토가 분진 형태로 제거되었기 때문으로 추정되며 제거된 미세토량은 전체 토양의 질량대비 약 5%로 확인되었다. 또한 열탈착공법으로 인한 유기물 함량은 $5.26 \pm 0.34\%$ 에서 정화 후 $4.67 \pm 0.11\%$ 로 약 0.59% 감

Table 2. Chemical properties of the test soils before (before TD) and after (after TD) thermal desorption treatment

Content	Unit	Before TD	After TD	Non-contaminated soil (NCS)
TPH	mg/kg	$5,133 \pm 508$	272 ± 107	N.D ¹⁾
pH	-	6.5 ± 0.1	6.8 ± 0.0	7.1 ± 0.0
EC	dS/m	1.550 ± 0.115	0.871 ± 0.007	0.653 ± 0.016
CEC	cmol/kg	5.353 ± 0.707	3.960 ± 0.660	5.133 ± 0.207
Organic matter	%	5.26 ± 0.34	4.67 ± 0.11	-

¹⁾Not detected

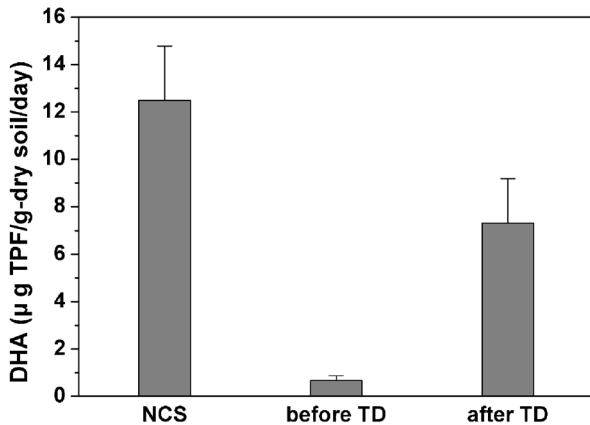


Fig. 2. Change of dehydrogenase activity of soil before and after treatment.

소된 것으로 확인되었다($p < 0.046$)*. 정병간 외(2001)는 우리나라 밭 토양의 화학적 특성을 조사한 결과 유기물함량이 평균 2.4%라는 것을 확인하였고, 장기운 외(1999)는 토양 내 유기물함량의 적정범위는 2.0~3.0%라고 보고하였다. 본 실험에서는 고온(약 700°C)의 열풍으로 인해 다량의 토양 유기물 산화가 우려되었으나 그 감소폭이 크지 않았고 정화 후에도 여전히 토양의 유기물 함량은 적정수준 이상인 것으로 확인되었다. Miyazawa et al.(2000)은 유기물을 포함한 토양의 TGA(Thermo-Gravimetric Analysis) 분석을 통해 토양의 온도가 증가함에 따라 수분의 증발(100°C 이하), 유기물 분해(200°C~280°C), 유기물의 탄소산화반응($R-CH+O_2 \rightarrow CO_2+H_2O$, 270°C~370°C), 금속수산화물의 탈수산화 반응($M-OH \rightarrow MO+H_2O$, 380°C~530°C)의 4단계에 걸쳐 질량 손실이 나타난다고 하였다. 본 실험에서는 고온(약 700°C)의 열풍을 토양에 가하였으나 토양의 최고온도는 비교적 저온인 200°C에 그쳤고 열에 노출되는 시간이 15분 이내에 머물렀기 때문에 토양 내 유기물을 산화하기에는 충분한 조건이 아니었다고 판단된다. 또한 저온열탈착장치로 인한 유기물 산화 가능성을 평가한 타 연구들에서도(민형식 외, 2009, 하상안·엄혜경, 2007, 서재도, 2011) 유기물의 산화는 비교적 크지 않다는 결과를 제시하며 본 연구결과와 비슷한 경향을 보였다. 다만, 유기물 총량만으로 토양생물이 이용 가능한 유효 유기물 함량을 평가하기에는 한계가 있어 유기물의 성상변화에 대한 추가적인 연구를 통해 보다 심층적인 고찰이 추후 필요할 것으로 판단된다. 위 결과들을 통해 저온열탈착장치는 토양의 EC, CEC, 유기물 함량 등을 다소 감소시키지만 그 감소폭은 토양의 화학적 특성을 변화시킬 수 있을 만큼 크지 않은 것으로 판단된다.

3.2. 토양의 생태학적 특성변화

Garcia et al.(1997)은 토양 내 탈수소효소 활성도가 바이오매스 탄소(biomass carbon), 미생물 기초호흡(basal respiration)과 비례하는 것을 보이며 미생물의 활성도를 나타내는 지표로 활용할 수 있다고 하였고, 여러 연구에서 탈수소효소 활성도를 미생물의 활성도를 나타내는 지표로 사용하였다(Ross, 1970, Mresi and Schinner, 1991). 또한 검출시간이 빠르고 독성물질에 민감한 반응을 보이며 비교적 분석이 쉽기 때문에(Scholz et al., 2002) 탈수소효소 활성도는 오염물질의 독성을 나타내는 지표로 다양한 연구에서 활용되어왔다(주성현·정성철, 1998, 남운선 외, 2008, 홍선화 외, 2011). 본 실험에서는 탈수소효소 활성도를 분석한 결과 주변 비 오염토양(NCS)이 $12.483 \pm 2.304 \mu\text{g TPF/g-dry soil/day}$ 를 보였지만 유류오염 토양은(before TD) $0.669 \pm 0.195 \mu\text{g TPF/g-dry soil/day}$ 으로 급격히 저감되었고 열탈착장치를 통한 정화 후(after TD)에는 $7.322 \pm 1.857 \mu\text{g TPF/g-dry soil/day}$ 로 일정수준 회복되는 양상을 보였다($p < 0.002$)*. 이는 고농도 유류오염이 미생물에 독성으로 작용하여 탈수소효소 활성도가 크게 저감되었다가 열탈착 정화공정을 통해 오염농도 및 독성이 저감되면서 미생물의 활성도가 회복되는 과정으로 추정할 수 있다.

비 오염토양 및 열탈착 전후의 토양에 대해 적겨자(*Brassica juncea*) 발아 실험을 수행하여 토양의 오염 및 정화이력이 식물의 발아율에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 적겨자는 중금속 오염토양의 식물학적 정화에 활용하기 위한 노력으로 오염토양 내 생장실험에 많이 활용되었고(Singh and Sinha, 2005, Bluskov et al., 2005), 그 외에도 다양한 오염물질에 대한 식물 독성평가에 활용되고 있다(Kaur et al., 2005, Ghodake et al., 2010). 본 실험에서는 적겨자를 세 종류의 토양에 파종한 뒤 8일 후 발아되는 씨앗의 비율을 Fig. 3에 도시하였다. 그 결과 고농도의 TPH로 오염된 토양(before TD)에서는 오염물질의 독성으로 인해 모든 씨앗이 발아되지 못하였다. 열탈착공법의 적용 후 토양(after TD) 내 존재하는 오염물질의 농도가 저감됨으로써 적겨자 발아율은 $26.7 \pm 5.8\%$ 로 향상되었으나($p < 0.001$)* 주변 비 오염토양의 적겨자 발아율($76.7 \pm 23.1\%$)에 미치지 못하였다.

붉은줄 지렁이(*Eisenia andrei*)는 유기오염물질로 인한 생태학적 독성평가에 많이 활용되고 있으며(Robidoux et al., 2000, Cermak et al., 2010) 특히 Saterbak et al.(2000)은 유류오염토양의 정화를 통한 생태학적 특성변화를 평가하기 위해 붉은줄 지렁이를 이용하였다. 본 실험

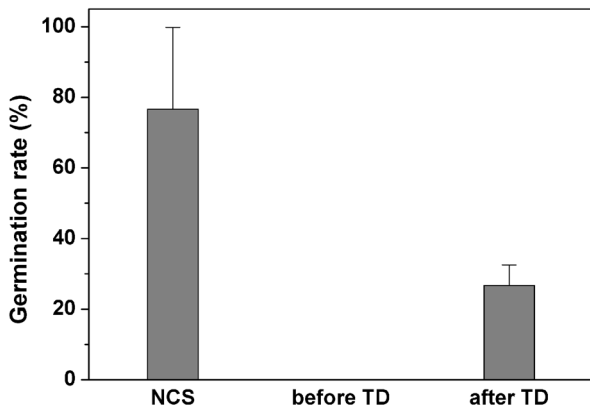


Fig. 3. Germination rates of *Brassica juncea* at 8th day after seeding in the non-contaminated soil (NCS), contaminated soil (before TD) and remediated soil (after TD).

에서는 세 가지 종류의 토양을 대상으로 붉은줄 지렁이 성장실험을 수행하였으며 14일 후 지렁이의 무게 변화를 통해 생태학적 건전성을 평가하였다. 열탈착공법을 적용하기 전 토양(before TD)에서는 유류오염물질의 독성으로 인해 붉은줄 지렁이의 무게는 0.364 ± 0.002 g에서 0.292 ± 0.016 g으로 약 19.9%가 감소하였다. 이는 토양 내 TPH가 지렁이의 생장을 저해하는 요인으로 작용하는 것을 의미하며, 열탈착공법을 적용한 정화토양(after TD)의 경우 붉은줄 지렁이의 무게는 14일 동안 0.346 ± 0.017 g에서 0.346 ± 0.012 g으로 일정한 값을 가지며 붉은줄 지렁이의 무게변화율은 0.0%로 확인되었다($p < 0.005$)*. 참고로 일반 비 오염토양의 경우 지렁이의 무게는 14일간 약 8.3% 증가한 것을 확인할 수 있었다(0.371 ± 0.019 g \rightarrow 0.402 ± 0.034 g).

탈수소효소 활성도, 적거자 발아율, 붉은줄 지렁이 무게 변화를 분석하여 열탈착공법 적용 전후 토양의 생태학적 건전성을 평가한 결과 열탈착공법의 적용을 통해 토양의 생태학적 건전성은 다소 향상되는 것으로 확인되었다. Table 2에 나타난 토양의 화학적 특성변화를 살펴보면 EC, CEC, 유기물 함량이 다소 감소하는 경향을 보였으나 세 종류의 토양에서 큰 차이가 없었고, 가장 큰 변화는 정화를 통해 저감된 TPH 농도였다. 따라서 저온열탈착공법의 적용을 통해 향상된 토양의 생태학적 건전성은 오염물질의 독성저감을 통해 이뤄진 것으로 판단된다. 비 오염토양은 열탈착공법이 적용된 토양에 비해 비교적 멀리 떨어진 곳에서 채취된 토양으로 직접적인 비교를 할 수는 없었지만 열탈착공법을 적용시킨 토양의 생태학적 건전성은 주변의 일반 비 오염토양에 비해서는 다소 낮은 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 화학적, 생태학적 특성변화

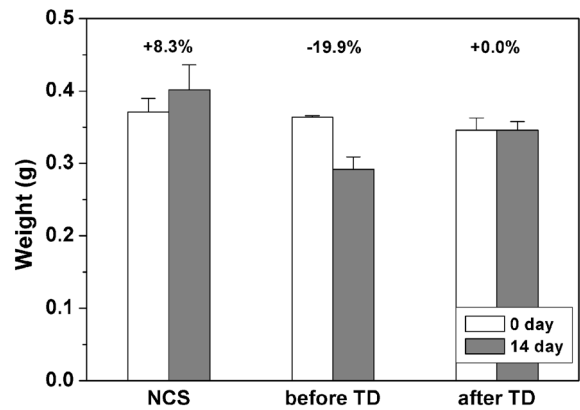


Fig. 4. Changes of *Eisenia andrei*'s weight at 14 days in different types of soil; non-contaminated soil (NCS), contaminated soil (before TD) and remediated soil (after TD).

실험결과들을 고려할 때 EC, CEC, 유기물 함량의 저하에 의한 차이라기보다 잔류 오염물질의 독성에 기인한 것으로 추정된다.

3.3. 대기환경에 미치는 배출가스의 영향

오염토양은 진동선별기를 통해 직경 50 mm 이하로 선별된 후 컨베이어벨트를 통해 로터리킬른 내로 투입된다. 투입된 토양은 킬른 내에서 상하로 교반되며 열풍에 의해 대부분의 수분이 제거된 상태로 킬른 밖으로 배출되게 된다. 이 과정을 통해 수많은 분진이 발생하게 되는데 이러한 분진은 작업자의 작업환경뿐만 아니라 미세먼지의 확산으로 주변 시설에 피해를 입힐 수 있다. 본 실험에 활용된 저온열탈착장치는 이러한 피해를 최소화하기 위해 배관 내 음압을 유지하여 외부로 배출을 차단하고 토양 배출구에 물을 분사하여 먼지 발생을 최소화 하였으며 필요한 시설에 방진막을 설치하였다. 저온열탈착장치에서 발생하는 배출가스의 성분을 대기환경보전법 배출규제항목에 근거하여 분석한 결과(Table 3) 먼지, 미세먼지, 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소의 값이 기준치 이내로 배출되는 것을 확인하였다. 법적기준 농도는 엄격한 기준인 '기타 지역'에 준하여 설정되었고, Table 3에 작성된 항목 외의 규제 물질은 발생하지 않았다.

열탈착장치의 정화 원리상 토양 내 존재하던 유류오염물질은 탈착되어 순환 열풍 내 VOCs로 존재하게 된다. 이러한 VOCs는 대기 중으로 직접 배출되면 인체 및 대기환경에 악영향을 미치며, 작은 양으로도 악취를 유발할 수 있어 배출 전 적절한 처리가 반드시 필요하다 (Statheropoulos et al., 2007). 본 연구에 활용된 저온열탈착장치는 RTO 내에서 VOCs를 연소하여 무해한 물질

Table 3. Analysis of exhaust gases sampled at stack and boundary (15m distance from the stack)

Content	Unit	Stack	Site boundary	Regulation level
Dust	mg/Sm ³	8.7	–	20
Dispersion particles	mg/Sm ³	–	0.0357	0.5
NO _x	ppm	31.0	0.011	70
SO _x	ppm	1.0	0.036	30
CO	ppm	36.8	1.4	50

Table 4. Chemical analysis of circulation gas

(Unit: ppb)

VOC group	VOCs	Before RTO	After RTO	Regulation level in Korea
Aromatic series	Benzene	431.0	48.8	10,000
	Toluene	58.4	21.0	
	Ethylbenzene	2.5	2.5	
	Xylene ¹⁾	10.5	6.7	1,000
	Styrene	N.D ²⁾	11.7	400
	1,3,5-trimethylbenzene	0.6	N.D	
	1,2,4-trimethylbenzene	1.2	N.D	
	m/p-ethyltoluene	0.2	0.3	
Alkane series	N-dodecane	0.9	N.D	
	N-tridecane	4.9	2.6	
	N-tetradecane	4.9	2.2	
	N-hexadecane	3.6	2.1	
	N-undecane	N.D	N.D	
	N-nonane	5.1	N.D	
Alcohol series	2-propanol	8.2	N.D	
	N-butanol	N.D	21.5	
Ester series	N-butyl acetate	1.3	N.D	1,000
Ketone series	Acetone	1,464.5	202.6	
	2-butanone	164.2	14.3	13,000
	4-methyl-2-pentanone	4.8	2.9	1,000
Aldehyde series	Formaldehyde	1,090.1	85.7	
	Acetaldehyde	8,052.5	34.4	50
	Propionaldehyde	1,437.7	43.3	50
	Crotonaldehyde	43.0	N.D	
	Methacrolein	152.0	2.9	
	Butyraldehyde	246.6	7.7	9
	Benzaldehyde	N.D	4.2	
	Valeraldehyde	60.2	2.4	12 ³⁾
	p-Tolualdehyde	41.6	6.2	
Hexaldehyde	82.4	5.5		
<i>n</i> -Aliphatic alkane series	Hexane	11.1	109.2	
	N-heptane	21.9	N.D	
	N-octane	N.D	N.D	

¹⁾ Xylene is sum of *o*-xylene and *m,p*-xylene²⁾ N.D: not detected³⁾ *n*-valeraldehyde=9, *i*-valeraldehyde=3

Table 5. Analysis of complex odor sampled at the stack and boundary (15 m distance from the stack)

Content	Unit	Stack	Boundary
Mixed odor		208	3
Regulation level	Dilution rate	500	15

로 분해 및 제거한 후 대기 중으로 배출한다. RTO로 유입되기 직전의 열풍을 취하여 VOCs 농도를 분석한 결과 발생 VOCs(Aromatic, Alkane, Alcohol, Ester, Ketone, Aldehyde, n-Aliphatic alkane series)의 총량은 13,406 ppb였으며 acetaldehyde, propionaldehyde, butyraldehyde, valeraldehyde의 농도가 지정악취물질 규제농도를 초과하였다(Table 4). RTO에서 VOCs의 연소를 통해 배출된 배기가스의 VOCs 농도는 641 ppb로 약 95.2%의 VOCs가 RTO내에서 산화되었다. 또한 기준치를 초과했던 acetaldehyde, propionaldehyde, butyraldehyde, valeraldehyde를 포함한 지정악취물질이 모두 기준 이내로 저감되는 것을 확인하였다. 이를 통해 저온열탈착장치에서 배출되는 가스가 대기환경에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 확인되었다.

저온열탈착장치에서 발생하는 복합악취(희석관능법) 분석결과 배출구와 부지경계에서 각각 208, 3(희석배수)을 보이며 법적기준을 만족하였다(Table 5). 이는 Table 4에 나타낸 바와 같이 악취를 유발할 수 있는 VOCs가 대부분 낮은 농도로 존재하기 때문인 것으로 판단되며 이 결과를 통해 저온열탈착장치의 구동으로 인해 발생하는 배기가스는 대기환경적인 영향이 적을 뿐만 아니라 악취로 인해 주변에 불쾌감을 줄 우려도 적을 것으로 예상된다.

4. 결 론

저온열탈착장치를 통한 정화 공법이 환경에 미치는 영향을 파악하기 위해 (1)정화 전후 토양의 화학적, 생태학적 특성변화를 분석하여 토양환경에 미치는 영향, (2)배출되는 배기가스를 분석하여 대기환경에 미치는 영향을 각각 평가하였다.

저온열탈착공법을 적용한 뒤 토양의 EC, CEC, 유기물 함량은 다소 감소하였으나 그 감소폭은 토양의 화학적 특성을 변화 시킬 수준은 아니라고 판단되어 토양의 화학적 인 기능은 크게 저하되지 않고 보존되는 것으로 확인되었다. 이는 저온열탈착장치 내로 유입된 토양이 상대적으로 낮은 온도(약 200°C)에서 짧은 시간(15분 이내) 동안 머무르며 유류오염물질의 휘발이 유도되었기 때문으로 판단

된다. 오염토양의 탈수소효소 활성도, 적거자 발아율, 붉은줄 지렁이 무게변화는 저온열탈착공법을 적용시킨 후 다소 향상되는 것을 보이며 오염토양의 생태학적 특성은 저온열탈착공법을 통해 일정수준 개선되는 것으로 확인되었다. 그 이유는 토양의 화학적 기능을 유지하며 오염물질의 농도 및 독성을 저감시켰기 때문인 것으로 판단된다. 다만 정화 후 토양이 여전히 비 오염토양에 비해 다소 낮은 생태학적 특성을 보였는데 이는 잔류하는 오염물질의 독성 때문인 것으로 보인다.

저온열탈착장치의 굴뚝으로 배출되는 물질은 대기환경 보전법의 배출규제 기준을 모두 만족하였으며, 먼지 및 비산먼지로 인한 영향 또한 적은 것으로 확인되었다. 배기가스의 VOCs 농도는 RTO 내의 연소과정을 통해 95.2%가 저감되어 배출되었으며 모든 지정악취물질은 법적기준 이내의 농도로 배출되었다. 배기가스의 복합악취 분석결과 또한 법적기준을 만족하였고 이는 악취를 유발할 수 있는 VOCs가 RTO 내에서 대부분 제거되었기 때문으로 확인되었다.

본 연구를 통하여 저온열탈착 처리된 정화토양은 정화 전 오염토양에 비해 생태학적 특성이 다소 향상되었음을 확인할 수 있었고 배출가스 또한 대기환경에 미치는 영향이 적어 저온열탈착(LTTD) 공정은 환경적으로 수용 가능한 공정임을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 2011년도 토양지하수오염방지기술개발사업(GAIA project)의 연구비 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 김국진, 이선화, 박광진, 김치경, 이철효, 김도선, 조석희, 장운영, 2008, 열순환식 저온열탈착 정화장치의 개발 및 유류오염 토양 현장 적용, 지하수토양환경, 13(4), 62-68.
- 남윤선, 이인숙, 배범한, 2008, 폐밀정자에 의한 농토양내 아연 존재형태 및 탈수소효소-활성도 변화, 대한환경공학회, 30(11), 1154-1160.
- 농촌진흥청, 1999, 작물별 시비처방 기준, 광문당, 8-51.
- 민형식, 양인호, 정상조, 김한승, 2009, 직접 가열식 열탈착 공정을 이용한 유류오염토양의 정화, 지하수토양환경, 14(5), 62-70.
- 서재도, 2011, 기름오염토양 복원을 위한 열탈착 장치의 효율적 운전에 관한 연구, 아주대학교 석사학위논문, 44-45.

- 양지원, 이유진, 2007, 국내 오염토양 복원 현황과 기술 동향, *한국화학공학회*, **45**(4), 311-318.
- 장기운, 조성현, 광정하, 1999, 계분 및 돈분퇴비의 연용에 의한 토양의 물리화학적 변화, *유기성자원학회*, **7**(1), 23-30.
- 정병간, 최정원, 윤을수, 윤정희, 김유학, 정구복, 1998, 우리나라 시설원에 재배지 토양 화학적 특성, *한국토양비료학회*, **31**(1), 9-15.
- 정병간, 최정원, 윤을수, 윤정희, 김유학, 2001, 우리나라 밭 토양 화학적 특성, *한국토양비료학회*, **34**(5), 326-332.
- 조원실, 조경숙, 2008, 갯벌 미생물 활성 및 다양성에 미치는 Methyl tert-Butyl Ether(MTBE)와 MTBE 대사산물의 영향, *한국미생물 · 생명공학회지*, **36**(4), 336-342.
- 주성현, 정성철, 1998, 대구시 가로수 토양의 이화학적 성질, 중금속 함량, 탈수소효소 활성도에 관한 연구, *환경과학논문집*, **12**, 49-56.
- 최상일, 김강홍, 2006, 고압공기분사를 이용한 유류오염토양 세척기법의 적용성 연구, *지하수토양환경*, **11**(6), 61-68.
- 하상안, 엄혜경, 2007, 저온 열 탈착에 의한 유류 오염토의 처리 조건의 연구, *대한환경공학회*, **29**(8), 956-960.
- 하상안, 유미영, 2008, 폐열 재순환 장치의 운전에 따른 저온 열 탈착 장치의 경제성 평가, *한국폐기물자원순환학회 춘계학술연구회발표논문집*, *한국폐기물자원순환학회*, 순천대학교, p. 520-523.
- 한국조경학회*, 2002, *조경설계기준*, 기문당.
- 홍선화, 이상민, 이은영, 2011, 토양미생물 복원제를 이용한 유류로 오염된 토양의 복원, *한국미생물생명공학회지*, **39**(3), 301-307.
- 환경부, 2007a, *오염토양 정화방법 가이드라인*, 환경부 토양지하수과, 11-1480000-000841-01, 14 p.
- 환경부, 2007b, *2007년도 전국 특정토양오염관리대상시설 관리현황*.
- Baligar, V.C., Wright, R.J., and Smedley, M.D., 1991, Enzyme activities in appalachian soil: 4. dehydrogenase, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **22**(17-18), 1797-1804.
- Bluskov, S., Arocena, J.M., Omotoso, O.O., and Young, J.P., 2005, Uptake, distribution, and speciation of chromium in *brassica juncea*, *Int. J. Phytoremediation*, **7**, 153-165.
- Cermak, J.H., Stephenson, G.L., Birkholz, D., Wang, Z., and Dixon, D.G., 2010, Toxicity of petroleum hydrocarbon distillates to soil organisms, *Environ. Toxicol. Chem.*, **29**(12), 2685-2694.
- Garcia, C., Hernandez, T., and Costa, F., 1997, Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **28**(1&2), 123-134.
- Ghodake, G., Seo, Y.D., Park D., and Lee, D.S., 2010, Phytotoxicity of carbon nanotubes assessed by *brassica juncea* and *phaseolus mungo*, *J. Nanoelectronics and optoelectronics*, **5**, 157-160.
- Khan, F.I., Husain, T., and Hejazi R., 2004, An overview and analysis of site remediation technologies, *J. Environ. Manage.*, **71**, 95-122.
- Kaur, H., Inderjit, and Kaushic, S., 2005, Cellular evidence of allelopathic interference of benzoic acid to mustard (*Brassica juncea* L.) seedling growth, *Plant Physiol. Biochem.*, **43**, 77-81.
- Lee, M.R., Lee, R.J., Lin, Y.W., Chen, C.M., and Hwang, B.H., 1998, Gas-phase postderivatization following solid-phase microextraction for determining acidic herbicides in water, *Anal. Chem.*, **70**, 1963-1968.
- Luo, C.L., Shen, Z.G., and Li, X.D., 2008, Root exudates increase metal accumulation in mixed cultures: implications for naturally enhanced phytoextraction, *Water Air Soil Pollut.*, **193**, 147-154.
- Miyazawa, M., Pavan, M.A., Oliveira, E.L., Ionashiro, M., and Silva, A.K., 2000, Gravimetric determination of soil organic matter, *Brazilian Arch. Biol. technol.*, **43**(5), 475-478.
- Mresi, W. and Schinner, F., 1991, An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodinitrotetrazilium chloride, *Biol. Fertil. Soils.*, **11**, 210-220.
- Robidoux, P.Y., Hawari, J., Thiboutot, S., Ampleman, G., and Sunahara, G.I., 1999, Acute toxicity of 2,4,6-trinitrotoluene in earthworm (*eisenia andrei*), *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **44**, 311-321.
- Robidoux, P.Y., Svendsen, C., Caumartin, J., Hawari, J., Ampleman, G., Thiboutot, S., Weeks, J.M., and Sunahara, G.I., 2000, Chronic toxicity of energetic compounds in soil determined using the earthworm (*Eisenia andrei*) reproduction test, *Environ. Toxicol. Chem.*, **19**(7), 1764-1773.
- Ross, D.J., 1970, Effects of storage on dehydrogenase activities of soils, *Soil Biol. Biochem.*, **2**, 55-61.
- Saterbak, A., Toy, R.J., Mcmain, B.J., Williams, M.P., and Dorn, P.B., 2000, Ecotoxicological and analytical assessment of effects of bioremediation on hydrocarbon-containing soil, *Environ. Toxicol. Chem.*, **19**(11), 2643-2652.
- Scholz, M., Xu, M., and Jing, K., 2002, Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper. *Biore. Technol.*, **83**, 71-79.
- Shakir Hanna, S.H. and Weaver, R.W., 2002, Earthworm survival in oil contaminated soil, *Plant Soil*, **240**, 127-132.
- Shen, G., Lu, Y., Zhou, Q., and Hong, J., 2005, Interaction of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals on soil enzyme, *Chemosphere*, **61**, 1175-1182.
- Singh, S. and Sinha, S., 2005, Accumulation of metals and its effects in *Brassica juncea* (L.) Czern. (cv. Rohini) grown on various amendments of tannery waste, *Ecotoxicol. Environ. Safety*, **62**, 118-127.

Statheropoulos, M., Agapiou, A., Spiliopoulou, C., Pallis, G.C., and Sianos, E., 2007, Environmental aspects of VOCs evolved in the early stages of human decomposition, *Sci. Total Environ.*, **385**, 221-227

USEPA, 2004, How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: A guide for corrective action plan reviewers, Chapter VI: Low-temperature thermal desorption, *Soild waste and emergency response 5401G*, EPA 510-R-04-002.

USEPA, 2008, Green remediation: Incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated site, *U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response*, EPA 542-R-08-002.

Wang, Q.Y., Zhou, D.M., Cang, L., and Sun, T.R., 2009, Application of bioassays to evaluate a copper contaminated soil before and after pilot-scale electrokinetic remediation, *Environ. Pollut.*, **157**, 410-416.